



**FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING
AND INFORMATION SCIENCE**



**INFORMATION TECHNOLOGY AND
ELECTRICAL ENGINEERING -
DEVICES AND SYSTEMS,
MATERIALS AND TECHNOLOGIES
FOR THE FUTURE**

Startseite / Index:

<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=12391>

Impressum

Herausgeber: Der Rektor der Technischen Universität Ilmenau
Univ.-Prof. Dr. rer. nat. habil. Peter Scharff

Redaktion: Referat Marketing und Studentische
Angelegenheiten
Andrea Schneider

Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
Susanne Jakob
Dipl.-Ing. Helge Drumm

Redaktionsschluss: 07. Juli 2006

Technische Realisierung (CD-Rom-Ausgabe):
Institut für Medientechnik an der TU Ilmenau
Dipl.-Ing. Christian Weigel
Dipl.-Ing. Marco Albrecht
Dipl.-Ing. Helge Drumm

Technische Realisierung (Online-Ausgabe):
Universitätsbibliothek Ilmenau
[ilmedia](#)
Postfach 10 05 65
98684 Ilmenau

Verlag:  Verlag ISLE, Betriebsstätte des ISLE e.V.
Werner-von-Siemens-Str. 16
98693 Ilmenau

© Technische Universität Ilmenau (Thür.) 2006

Diese Publikationen und alle in ihr enthaltenen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt. Mit Ausnahme der gesetzlich zugelassenen Fälle ist eine Verwertung ohne Einwilligung der Redaktion strafbar.

ISBN (Druckausgabe): 3-938843-15-2
ISBN (CD-Rom-Ausgabe): 3-938843-16-0

Startseite / Index:
<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=12391>

F. Reichert, D. Gonzalez, A. Marschall

Diagnostik von Niederspannungs-Schaltlichtbögen

Kurzfassung

Bei der Trennung der Kontaktstücke in mechanischen Schaltgeräten entsteht ein Schaltlichtbogen, dessen Verhalten essentiell für die Funktion des Schaltgerätes ist. Eine Weiterentwicklung der am Ausschaltvorgang beteiligten Schaltgeräte oder die Feststellung ihres Schaltvermögens kann nur in Begleitung von gezielt konzipierten experimentellen Untersuchungen an realen Schaltern und an Versuchsmodellen erfolgen, wobei eine aussagekräftige Diagnostik nur durch eine angepasste und möglichst genaue Messtechnik gewährleistet werden kann. In diesem Beitrag wird eine Herangehensweise zur Diagnostik von Niederspannungs-Schaltlichtbögen vorgestellt, die auf der gleichzeitigen Anwendung verschiedener Messmethoden basiert. Es werden ausgewählte Ergebnisse präsentiert, die sowohl an einem modifizierten realen Schaltgerät als auch an einem Versuchsmodell erzielt wurden.

Schlagwörter: Diagnostik, Schaltlichtbogen, Magnetfeldsensoren, Hochgeschwindigkeitskamera, piezoelektrische Drucksensoren, Kontakttrennung, Lichtbogenlaufverhalten

1 Einleitung

Die experimentelle Untersuchung des Schaltlichtbogens ist für die Entwicklung der Schaltgeräte und für die Verbesserung deren Schaltvermögen unerlässlich. Dabei spielt die angewandte Messtechnik für die Diagnostik der Lichtbogenphänomene in den kleinräumigen Niederspannungs-Schaltgeräten eine entscheidende Rolle.

Während sich an freibrennenden, wandstabilisierten und elektrodenstabilisierten Lichtbögen in freier Umgebung eine Reihe von Einflussfaktoren (Elektrodenabstand, Umgebungsgas und -druck usw.) und andere Lichtbogenparameter voreinstellen lassen, treten in Schaltgeräten durch die vorgegebene räumliche Begrenzung, die unerlässliche Kombination von unterschiedlichen Materialien (leitfähige, nicht leitfähige, magnetische, abgasende usw.) und die zeitliche sowie geometrische Änderung der Kontaktposition zusätzliche Schwierigkeiten auf, die die Lichtbogendiagnostik erschweren.

Die Diagnostik des Lichtbogens in Schaltgeräten verlangt demzufolge die gleichzeitige Nutzung und Kombination von unterschiedlichen Messtechniken, damit die hohe Zahl der im Schalter variierenden Lichtbogen- und Umgebungsparameter erfasst und analysiert werden kann. Zur Messung der unterschiedlichen in der Zeit variierenden Größen (Spannung, Strom, Lichtbogenleitfähigkeit, Kräfte, Druck, Lichtbogentemperatur, Energiezufuhr zu den Elektroden, Lichtbogen- und Lichtbogenfußpunktverhalten usw.) müssen mehrere Techniken kombiniert und abgestimmt werden. Die Beherrschung der eingesetzten Messtechnik stellt in sich selbst eine sehr komplexe und vielfältige Aufgabe dar, die es für aussagekräftige und genaue Ergebnisse zu bewältigen gilt. Dazu kommt, dass eine wirtschaftliche Durchführung von Experimenten nur durch die gezielte Konzipierung von möglichst angepassten Messtechniken realisierbar ist.

Auf die Lichtbogendiagnostik mit Hilfe von unterschiedlichen Messmethoden wird in einer Vielzahl von Literaturstellen eingegangen. Im Folgenden kann nur eine begrenzte Anzahl an Literaturstellen diskutiert werden.

- Prinzipiell stellt die Messung der klassischen Lichtbogenparameter wie Strom und Spannung die geringsten Schwierigkeiten dar. Dabei werden Shunts, ROGOWSKY-Spulen, HALL- Sonden sowie Spannungsteiler mit ausreichender Messbandbreite eingesetzt [z. B. 1, 2].
- Ungeeignet ist dagegen die Messung der Spannung der Säule, die sich durch im Plasma- bzw. Lichtbogenraum angebrachte Spannungssonden ergibt, um Lichtbogenparameter wie Temperatur oder Leitfähigkeit abzuleiten [z. B. 1, 3]. Die dabei resultierende Störung des Plasmas durch die Sonde sowie die unbekannte Struktur und Geometrie des Schaltlichtbogens machen die anhand dieser Technik abgeleiteten Plasmaparameter sehr fragwürdig. Die auftretenden Messfehler sind dabei unbekannt.
- Die Messung des Druckes in der Schalt- bzw. Löschkammer ist mit Hilfe von piezoresistiven [z. B. 1, 2, 4, 5] oder mit piezoelektrischen Drucksensoren [z. B. 3] realisierbar. Dabei ist die Empfindlichkeit der Sensoren gegenüber den mit der Zeit variierenden elektromagnetischen Feldern und gegenüber der von der Lichtbogensäule ausgehenden Strahlung (piezoelektrische Sensoren) zu beachten. Dies erfordert die Nutzung von batteriebetriebenen Stromquellen bzw. Verstärkern für die Sensoren sowie das Abschirmen der aufnehmenden Flächen der Drucksensoren.
- Für die Bestimmung der Temperatur und der Temperaturverteilung der Lichtbogensäule kommen indirekte nicht angreifende oder wenig angreifende optische Methoden wie die Emissionsspektroskopie [z. B. 1, 6] oder die Absorptionsspektroskopie [z. B. 7] in Frage. Problematisch stellt sich jedoch die übliche Annahme des lokalen thermodynamischen Gleichgewichtes (LTE) und der axialen Symmetrie des inhomogenen Schaltlichtbogens dar, die bei der Verwendung von emissionsspektroskopischen Methoden vorgenommen werden muss. Die Nutzung der Absorptionsspektroskopie geht mit einem sehr hohen experimentellen und kostenintensiven Aufwand einher, der z. B. durch die nötigen energiereichen Strahlungsquellen zum Durchleuchten des Lichtbogens und die Auswertung der Messdaten bestimmt ist. Hinzu kommt, dass durch den transienten Charakter des Schaltlichtbogens die Berücksichtigung der zeitlichen Komponente unerlässlich ist, woraus für die zu verwendenden optischen Temperaturmessmethoden weitere Schwierigkeiten erwachsen.
- Die erfolgreiche Bewegung des Lichtbogens während des Schaltvorganges ist für das Ermöglichen des Schaltens und für die Lebensdauer der Schaltgeräte von großer Bedeutung. Zur Beobachtung dieses Verhaltens dienen in der Regel optische Methoden wie Hochgeschwindigkeits-Filmaufnahmen [z. B. 1, 4, 8, 9], Lichtwellenleiter-Aufnahmesysteme [z. B. 3, 10], optoelektrische Messsysteme [z. B. 11] und elektronische *Streak*-Kameras [z. B. 2]. Eine Verfolgung der Bogenbewegung kann auch durch die Messung der durch den Lichtbogen generierten Magnetfelder mit Induktionsspulensensoren [z. B. 12, 13] oder mit Hall-Sensoren [z. B. 14] realisiert werden.

- Ein weiterer wichtiger Punkt für die Untersuchung der Schaltlichtbögen wird durch die verwendete Versuchsanordnung dargestellt.

Es können dabei modifizierte herkömmliche Schaltgeräte verwendet werden [z. B. 3, 5], die durch das Herausnehmen von Teilen oder Komponenten den experimentellen Zugang ermöglichen. Dadurch kann gleichzeitig sowohl das Schaltvermögen als auch der Schaltlichtbogen untersucht werden. Begrenzt ist jedoch die Erprobung neuer Geometrien oder von neuen Teilen für die Entwicklung und Verbesserung der Schaltgeräte.

Vielfach werden Versuchsmodelle verwendet, die die Vorgänge in herkömmlichen Schaltern möglichst realitätsnah nachbilden [z. B. 1, 2, 9, 12, 14]. Ein Vorteil solcher Versuchsmodelle ist der gute experimentelle Zugang und die Möglichkeit, die Wirkung der einzelnen Komponenten (Kontaktmaterialien, Laufschiene, Löschbleche, Bewandung usw.) auf den Lichtbogensvorgang getrennt untersuchen zu können.

In diesem Beitrag wird eine Herangehensweise bzgl. der Diagnostik von Niederspannungs-Schaltlichtbögen vorgestellt, die auf der gleichzeitigen Anwendung verschiedener Messmethoden einschließlich der simultanen Messung verschiedener physikalischer Größen basiert. Eingesetzt wurden sowohl herkömmliche Methoden (zur Messung der elektrischen Größen) als auch optische und magnetische Systeme zur Verfolgung der Lichtbogenbewegung sowie piezoelektrische Druckaufnehmer. Die Untersuchungen wurden sowohl an schalterähnlichen Versuchsaufbauten als auch an herkömmlichen Schaltern realisiert. Zur Analyse der geometrischen Lichtbogenstruktur sowie der Phänomene bei der Kontakttrennung dienten fotografische Aufnahmen mit sehr kurzen Belichtungszeiten, die mit Hilfe eines hochauflösenden CCD-Kamerasystems realisiert wurden.

2 Problemstellung und Randbedingungen für die Untersuchungen

Die zu betrachtenden Phänomene bestimmen sowohl den elektrischen Versuchskreis für die Durchführung der Experimente als auch die notwendige Modifikation eines zu untersuchenden realen Schaltgerätes bzw. den Aufbau eines Versuchsmodells. Darüber hinaus bestimmen sie die während der Experimente einzusetzende Messtechnik. In den folgenden Ausführungen werden zwei unterschiedliche Problemstellungen genannt und die daraus resultierenden Konsequenzen für die durchzuführenden Experimente erläutert.

2.1 Problemstellung

2.1.1 Blitzstrombeanspruchung von Niederspannungs-Schaltgeräten

Überstromschutzgeräte können an ihrem Einbauort von unterschiedlichen Blitzströmen durchflossen werden, siehe **Bild 2.1**. Die Schaltgeräte sind jedoch nicht in der Lage, diese Ströme zu begrenzen oder abzuschalten. Sie sind diesen Strömen ungeschützt ausgesetzt und können dadurch stark beansprucht werden. Dabei kann sowohl ihre Wirksamkeit als auch ihr Schaltvermögen entscheidend beeinträchtigt werden.

Durch den zunehmenden Einsatz von Überspannungsschutzgeräten in Niederspannungs-Anlagen werden die Belastungen durch Blitzströme für die Schaltgeräte zwar re-

duziert, es kommt jedoch zu Wechselwirkungen zwischen den beiden Schutzkonzepten. Die Überspannungsschutzgeräte haben die Aufgabe, Blitzströme und Blitzüberspannungen abzuleiten und den Spannungspegel für nachgeordnete Geräte bzw. Verbraucher auf ein verträgliches Maß zu reduzieren. Durch das Ansprechen der Überspannungsschutzgeräte und das Ableiten der Überspannungen kommt es zu transienten Ausgleichsströmen, die die Schaltgeräte zusätzlich belasten und zum Auslösen führen. Infolgedessen wird sowohl der bestehende Überspannungsschutz als auch ein möglicher Verbraucher kurzzeitig oder permanent vom Netz abgetrennt.

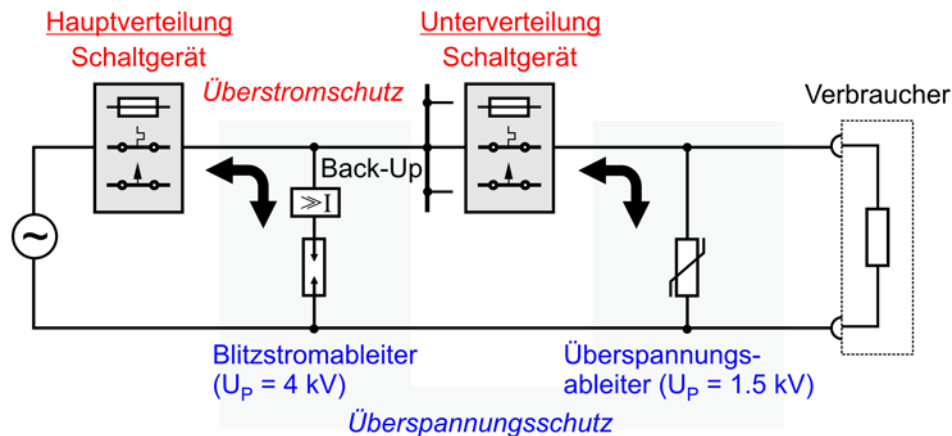


Bild 2.1: Einbau der Überstromschutzgeräte in der Niederspannungs-Installation

Ziel der Experimente ist die Untersuchung des Verhaltens von Leitungsschutzschaltern, wenn diese durch dem Betriebsstrom überlagerte impulsförmige Blitzströme beansprucht werden. Mit der Kenntnis um das Verhalten der Schalter während verschiedener Blitzstrombeanspruchungen soll eine bessere Koordination mit dem Überspannungsschutz und damit ein sicherer und unterbrechungsfreier Anlagenschutz erreicht werden. Dazu wird ein Versuchsaufbau verwendet, der unter **2.2** als Variante 1 bezeichnet wird. Für diese Untersuchungen erfolgt die Messung der Spannungs- und Stromverläufe. Darüber hinaus werden die Vorgänge im Schaltraum optisch aufgezeichnet.

2.1.2 Laufverhalten des Schaltlichtbogens

In Niederspannungs-Schaltgeräten, die nach dem Gleichstromschaltprinzip funktionieren, wird durch eine schnelle Impedanzänderung im Schaltgerät und durch die immer vorhandene Netzinduktivität eine im Gegensatz zur treibenden Spannung höhere Gegenspannung aufgebaut. Dadurch wird eine Stromumkehr erzwungen, und es kann noch vor dem netzfrequenten Nulldurchgang abgeschaltet werden. Die schnelle Impedanzänderung im Schaltgerät wird durch den bei der Trennung der Kontakte entstehenden Schaltlichtbogen realisiert. Dabei wird der Lichtbogen oft entlang von Laufschiene in Löschblechpakete geführt, wodurch infolge der Aufteilung in Teillichtbögen eine hohe Lichtbogen Spannung aufgebaut wird. Die Funktion dieser Schaltgeräte hängt demzufolge stark vom Laufverhalten des Lichtbogens in solchen Laufschieneanordnungen ab. Das Laufverhalten des Lichtbogens wird durch unterschiedliche Einflussgrößen bestimmt (resultierendes magnetisches Blasfeld, Material der Laufschiene und der Bewandung, Volumen der Schaltkammer, Material und Geometrie der Löschbleche usw.).

Ziel der Experimente ist die Untersuchung des Lichtbogenlaufverhaltens, die unter Verwendung einer variablen Laufschieneanordnung erfolgt. Zur Untersuchung dieser Vorgänge wird ein Versuchsaufbau verwendet, der unter **2.2** als Variante 2 bezeichnet wird. Neben der Messung der elektrischen Größen werden die Druckverhältnisse an ver-

schiedenen Positionen im Schaltvolumen erfasst. Des Weiteren steht die messtechnische Erfassung der Laufgeschwindigkeit und der geometrischen Struktur des Schaltlichtbogens im Mittelpunkt des Interesses.

2.2 Untersuchungsobjekte

Die für die Untersuchung der Phänomene verwendeten Untersuchungsobjekte (Variante 1: Untersuchung der Vorgänge an geschlossenen Schalterkontakten; Variante 2: Untersuchung des Lichtbogenlaufverhaltens an einer Versuchsgeometrie mit offenen Kontakten) sind in den **Bildern 2.2** und **2.3** dargestellt.

Bild 2.2 verdeutlicht die notwendige Modifizierung eines realen Schaltgerätes für die Gewährleistung des optischen Zuganges zum Kontaktraum während der Schaltversuche z. B. durch die Entfernung eines Teiles des Schaltergehäuses.

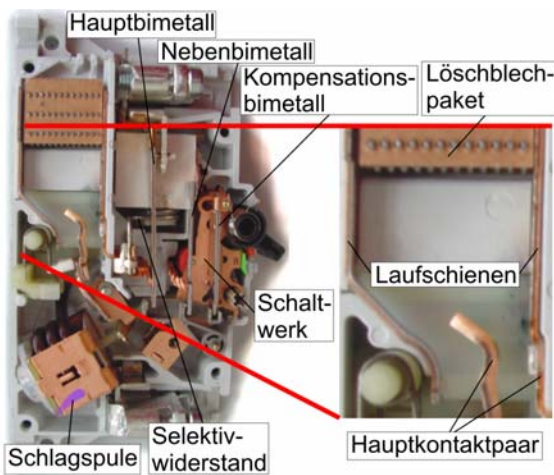


Bild 2.2: Modifiziertes Schaltgerät (selektiver Leitungsschutzschalter) für die Untersuchung der Vorgänge an den Schalterkontakten (Variante 1)

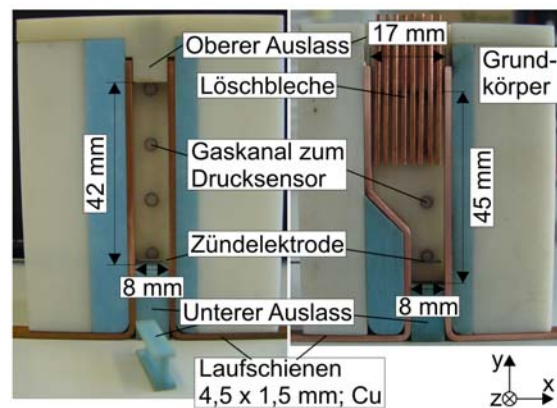


Bild 2.3: Versuchsmodell für die Untersuchung des Lichtbogenlaufverhaltens (Variante 2)

Das in **Bild 2.3** dargestellte Versuchsmodell besteht im Wesentlichen aus einem Grundkörper mit einer zentrierten Ausfräsung, in welcher die Laufschienen platziert werden können. Zur Gewährleistung von optischen Aufnahmen wird eine temperaturbeständige Quarzglasscheibe auf der Vorderseite verwendet. Das Versuchsmodell ermöglicht neben der Messung der elektrischen Parameter (Strom und Spannung) des Lichtbogens die Messung des Druckes an vier Positionen im Schaltvolumen und die Auswertung des Magnetfeldes infolge des Lichtbogens entlang der Laufschienen.

Dabei kann der Einfluss

- der Stromstärke,
- der Fläche des oberen und unteren Auslasses,
- der Laufschienen (Geometrie, Material) und
- der Löschbleche (Geometrie, Material, Abstand)

auf das Laufverhalten untersucht und analysiert werden.

2.3 Erzeugung der Prüfströme für die Experimente

Um reproduzierbare Bedingungen für die Untersuchungen zu gewährleisten, ist eine reproduzierbare Erregergröße für die Experimente notwendig. Dieser Forderung werden die in **Bild 2.4** dargestellten Versuchskreise zur Erzeugung der Prüfströme gerecht.

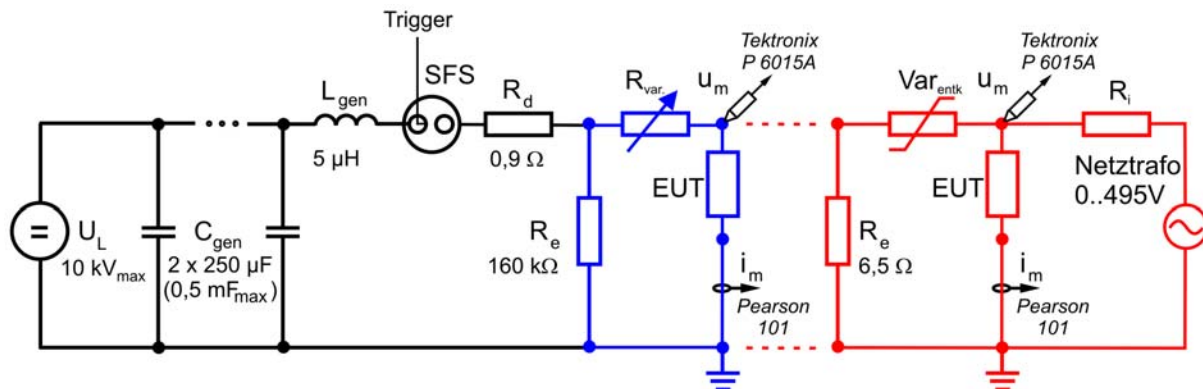


Bild 2.4: Ersatzschaltbild der Versuchskreise

Die auf die Ladespannung von maximal 10 kV aufgeladenen Kondensatoren C_{gen} entladen sich nach der Triggerung der Schaltfunkenstrecke SFS über den Versuchskreis bestehend aus der Generatorinduktivität L_{gen} , dem Dämpfungswiderstand R_d und dem Untersuchungsobjekt (in **Bild 2.4** EUT (*equipment under test*)).

Für die Untersuchung der Vorgänge an den Schalterkontakten (Variante 1) wird das Untersuchungsobjekt durch die in **Bild 2.4** rot dargestellte Beschaltung mit einem aperiodischen Stromimpuls der Form 10/350 µs oder der Form 8/20 µs und mit Spitzenwerten von bis zu 50 kA beaufschlagt, der dem netzfrequenten Strom überlagert wird.

Mit der in **Bild 2.4** blau dargestellten Beschaltung ist es möglich, im Versuchsmodell nach **Bild 2.3** Prüfströme zu erzeugen, die durch eine kleine Anstiegszeit, Maximalwerte bis zu einigen kA und einen geringen Abfall nach Erreichen des Maximalwertes gekennzeichnet sind, siehe **Bild 2.5**. Dabei wird der Maximalwert durch R_{var} eingestellt. Dieser Stromverlauf eignet sich sehr gut für die Untersuchung des Lichtbogenlaufverhaltens (Variante 2), da er nahezu konstante Magnetkräfte während der Lichtbogenbewegung entlang der Laufschienen gewährleistet und die Möglichkeit einer eindeutigen Zuordnung der gemessenen Geschwindigkeiten der Lichtbogenbewegung zum Prüfstrom bietet.

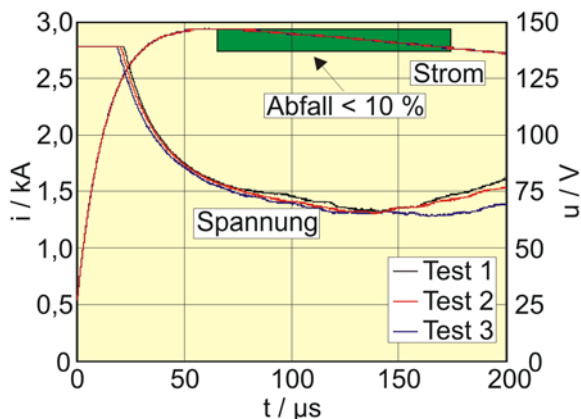


Bild 2.5: Messverläufe für einen Prüfstrom von 3 kA (Variante 2)

Die in **Bild 2.5** dargestellten Ströme sind nahezu identisch und erreichen ihren Maximalwert bei ca. 60 µs. Der Abfall des Lichtbogenstromes beträgt nur ca. 10 %, wenn der Lichtbogen das Ende der Laufschienen erreicht.

Zur Schonung des Versuchsmodells wird der Lichtbogen nach dem Durchlaufen der Laufstrecke durch die zeitlich synchronisierte gesteuerte Betätigung eines parallel angeordneten Kurzschließers (in **Bild 2.4** nicht dargestellt) zum Erlöschen gebracht.

3 Eingesetzte Messtechnik

Die Kenngrößen der eingesetzten Messtechnik für die Messung der elektrischen Größen des Lichtbogens sind in **Tabelle 3.1** aufgelistet. Für die Erfassung der optischen und magnetischen Lichtbogensignale wurde eine spezielle Messtechnik eingesetzt, deren Kenngrößen unter **4** genannt werden.

Parameter	Messgeräte	Bandbreite	Max. Wert	Teilverhältnis
Strom	Pearsonwandler	1,2 MHz	50 kA	0,01 V/A
Spannung	Tastkopf Lecroy	400 MHz	4000 V	1 : 100
Spannung	Tastkopf Tektronix P6015A	25 MHz	40000 V	1 : 1000
Druckaufnehmer	PCB M 111A24	400 kHz	138 bar	72 mV/bar
Speicherspeicher	DSO Lecroy	100 MS/s ... 1 GS/s	250 V	1:1 ... 1:10000

Tabelle 3.1: Technische Parameter der verwendeten Messgeräte

4 Ergebnisse der Experimente

4.1 Optische Untersuchungen

Für die optische Beobachtung der zu untersuchenden Phänomene stehen heute leistungsfähige Messsysteme zur Verfügung. Diese können sich hinsichtlich ihrer technischen Parameter (Aufnahmerate, Belichtungszeit, Auflösung usw.) stark voneinander unterscheiden. In dieser Arbeit wurden zwei unterschiedliche Hochgeschwindigkeitskameras verwendet. Die grundlegenden technischen Parameter der verwendeten Kameras sind in **Tabelle 4.1** aufgelistet.

Kodak EKTAPRO HS Motion Analyzer 4540	PCO HSFC-PRO
<ul style="list-style-type: none">- Hochgeschwindigkeitsvideokamera- Bildfolge:<ul style="list-style-type: none">+ max. 40500 Bilder/Sekunde(Auflösung 64x64 Pixel, 8 bitBelichtungszeit 24,7 µs)- Bildanzahl: 1024- Anzahl der Graustufen: 256	<ul style="list-style-type: none">- Digitale Hochgeschwindigkeitskamera- 4 optische Kanäle- Aufnahmebetriebsart:<ul style="list-style-type: none">+ Single Trigger Mode (1 Belichtung pro K.)(4 Bilder, Belichtungszeit: ≥ 3 ns)+ Double Trigger Mode (2 Belichtungen pro K.)(8 Bilder, Belichtungszeit: ≥ 20 ns)- Auflösung: 1280 x 1024 Pixel; 12 bit- Anzahl der Graustufen: 4096

Tabelle 4.1: Technische Parameter der verwendeten Kameras

Aus den in **Tabelle 4.1** aufgelisteten technischen Parametern resultieren die Einsatzmöglichkeiten der beiden Kameras.

Die Kamera HSFC-PRO zeichnet sich durch eine hohe räumliche Auflösung und die Möglichkeit aus, Aufnahmen mit sehr kleinen Belichtungszeiten (minimal 3 ns; äquivalent zu einer Aufnahmerate von 333 Millionen Bilder/Sekunde) zu realisieren. Dadurch können Integrationseffekte infolge großer Belichtungszeiten vermieden werden, und die aufgenommenen Erscheinungsbilder des Lichtbogens weisen eine hohe Qualität aus. Sie ermöglichen demzufolge eine bessere Beobachtung der geometrischen Struktur des Lichtbogens. Allerdings können bei dieser sehr hohen Bildaufnahmerate nur maximal 8 Aufnahmen pro Schaltversuch erzielt werden, die in zwei aufeinander folgenden Aufnahmezyklen (*double trigger mode*) der vier optischen Kanäle erfolgen. Diese Kamera kann demzufolge so eingesetzt werden, dass die Aufnahmezeitpunkte z. B. gezielt in spezielle Phasen der Lichtbogenbewegung platziert werden.

Die Kamera EKTAPRO weist im Vergleich mit der Kamera HSFC-PRO eine viel geringere räumliche und zeitliche (mehr als 1000fache Belichtungszeit) Auflösung auf. Dagegen verfügt sie über eine 128fache Bildanzahl. So ist es möglich, optische Aufnahmen während des gesamten Schaltversuches (maximal 25 ms Aufnahmezeit bei 40500 Bilder/Sekunde) durchzuführen. Diese Kamera kann demzufolge für die Beobachtung des globalen Lichtbogenverhaltens eingesetzt werden.

4.1.1 Untersuchung des Kontaktverhaltens von Niederspannungs-Schaltgeräten bei Blitzstrombeanspruchung

Für die Untersuchung dieser Vorgänge entsprechend der Variante 1 eignet sich die Hochgeschwindigkeitskamera HSFC-PRO. Die Aufnahmen mit der Kamera dienen dazu, die Vorgänge an den Schalterkontakten während der Belastung mit unterschiedlichen Blitzströmen und deren Auswirkung (Erhitzung, Anschmelzen, Kontakttrennung, Metallverspritzung, Lichtbogenzündung usw.) auf die Kontakte zu visualisieren. Ein Vorteil des PCO-Kamerasystems besteht in der Möglichkeit der unabhängigen zeitlichen Platzierung der Triggersignale für die verschiedenen Aufnahmen. Dabei liefert das PCO-Kamerasystem ein mit dem jeweiligen Triggerzeitpunkt korrespondierendes TTL-Ausgangssignal, welches zusammen mit den anderen Messgrößen im selben DSO erfasst und mit den übrigen Messwerten synchronisiert werden kann.

Ein Beispiel für die Untersuchung des Kontaktverhaltens anhand der optischen und elektrischen Signale ist in **Bild 4.1** bzw. **Bild 4.2** dargestellt. Hierbei wurden die Vorgänge an den Kontakten eines selektiven Leitungsschutzschalters während eines im Netz auftretenden Blitzimpulsstromes (Form 10/350 μ s, Spitzenwert 5,6 kA) beobachtet. **Bild 4.2** enthält neben den zeitlichen Verläufen von Strom und Spannung die Triggerzeitpunkte für das erste und letzte Bild des ersten Aufnahmezyklus (**Bild 4.1 a**) und **4.1. d**) sowie für das erste und letzte Bild des zweiten Aufnahmezyklus (**Bild 4.1 e**) und **4.1 h**)).

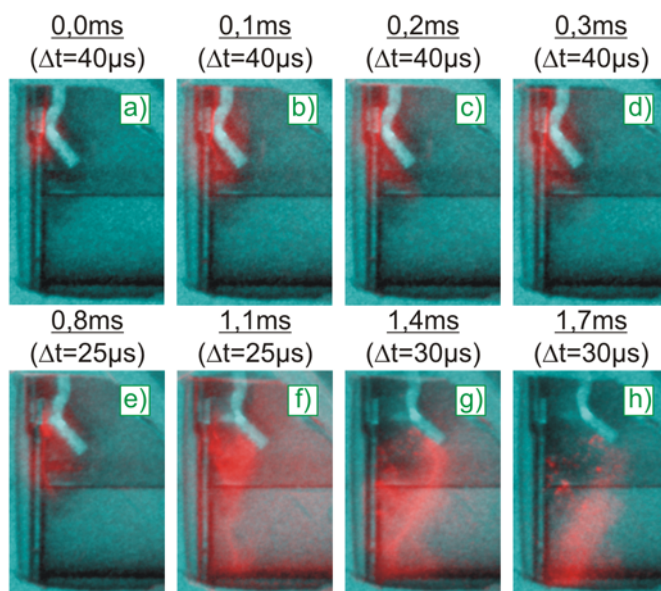


Bild 4.1: Aufnahmen des Schalterkontaktsystems bei Beanspruchung mit einem Blitzimpulsstrom (Spitzenwert 5,6 kA) und einem Netzstrom von 35 A

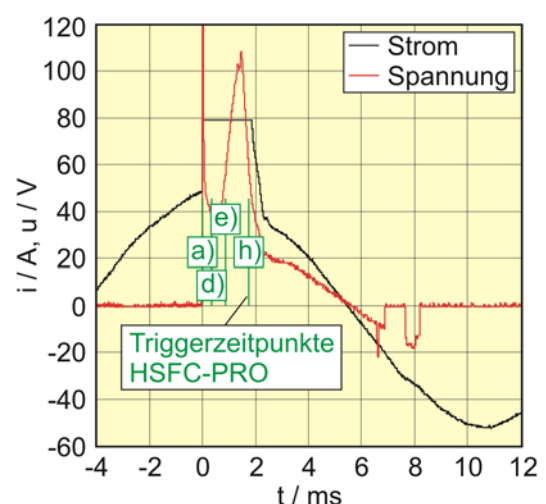


Bild 4.2: Zeitliche Verläufe von Strom und Spannung sowie Triggerzeitpunkte der HSFC-PRO für den Vorgang entsprechend **Bild 4.1**

Die erste Aufnahme (**Bild 4.1 a**) erfolgte gleichzeitig mit dem Auftreten des Impulsstromes. Anhand der aufgenommenen optischen und elektrischen Signale lassen sich die Auswirkungen am Kontaktsystem schrittweise analysieren. Beim Auftreten des Impulses bleibt die tatsächliche Kontaktfläche zunächst konstant, und mit dem Strom steigt die Stromdichte in den Berührungsflächen sehr stark an. Durch die erhöhten JOULEschen Verluste wird das Metall der Kontaktflächen stark erhitzt und aufgeschmolzen, was in den **Bildern 4.1 a**) bis **d**) erkennbar ist.

Nach etwa 0,55 ms werden die Kontakte durch die aufgrund ihrer Trägheit verzögerte Wirkung der Schlagspule geöffnet, und ein Lichtbogen entsteht. Der lineare Anstieg der Spannung ist auf die Verlängerung des Lichtbogens mit zunehmendem Kontaktabstand und die Wanderung des Bogens entlang der Laufschiene zurückzuführen (**Bilder 4.1 f**) und **g**)). Nach etwa 1,46 ms bricht die Lichtbogen­spannung zusammen, und der Lichtbogen verlischt, was aus der Betrachtung der **Bilder 4.1 g**) (noch vorhandener Lichtbogenkanal) und **4.1 h**) (nur noch Restplasma sichtbar) zu erkennen ist. Gleichzeitig beginnen sich die Kontakte wieder zu schließen, und beim Aufsetzen kommt es zu einem leichten Prellen, was durch den kurzzeitigen negativen Anstieg im Spannungsverlauf nach **Bild 4.2** (bei 6,5 ms und 7,6 ms) gekennzeichnet ist.

4.1.2 Untersuchung der Lichtbogenstruktur anhand optischer Aufnahmen

Für die optische Untersuchung der geometrischen Struktur des Schaltlichtbogens entsprechend der Variante 2 wurden beide Aufnahmesysteme eingesetzt. Für die Durchführung der Versuche wurden die optischen Eingänge der beiden Kameras übereinander angeordnet, so dass beide Kameras gleichzeitig dasselbe Erscheinungsbild des Lichtbogens „sahen“ und aufnehmen konnten.

Bei der Interpretation der optischen Aufnahmen sind die wichtigsten technischen Parameter wie räumliche und zeitliche Auflösung der verwendeten Hochgeschwindigkeitskameras zu berücksichtigen. Der Vergleich der optischen Aufnahmen der Kameras EKTAPRO und HSFC-PRO vom gleichen Lichtbogenvorgang nach **Bild 4.3** verdeutlicht dies.

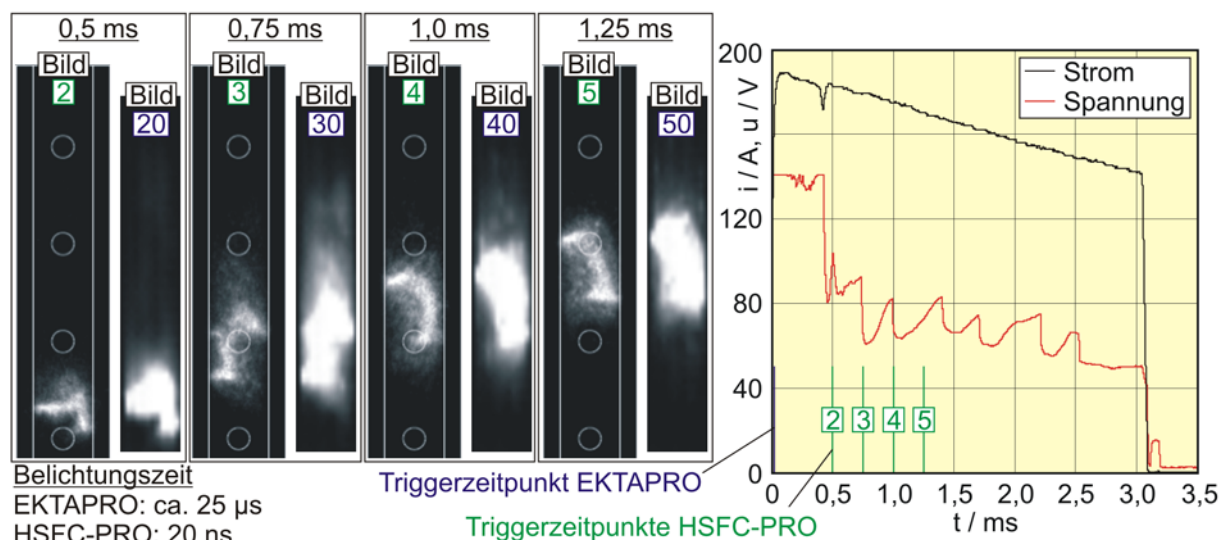


Bild 4.3: Aufnahmen des Lichtbogens im Versuchsmodell mit parallelen Laufschiene für einen Prüfstrom von 200 A und zugehörige Verläufe von Strom und Spannung

Mit der HSFC-PRO wird die tatsächliche Lichtbogenstruktur infolge der höheren Pixelzahl und der viel geringer einstellbaren Belichtungszeit (20 ns) besser aufgelöst. Deutlich sind die von den Elektroden ausgehenden Plasmastrahlen und die dazwischen senkrecht stehende Säule des Lichtbogens zu erkennen. Aufgrund der größeren Belichtungszeit bei Verwendung der Kamera EKTAPRO (ca. 25 μ s) und der damit verbundenen zeitlichen Integration während der Belichtung erscheint der Lichtbogen viel voluminöser, und speziell bei 0,75 ms sind über dem Lichtbogen Leuchterscheinungen zu erkennen, die bei der zugehörigen Momentaufnahme der Kamera HSFC-PRO nicht vorkommen.

4.2 Verfolgung der Fußpunktbewegung mittels Magnetfeldmessung

Wie unter 1 erläutert, gibt es in der Literatur zahlreiche Beispiele für die Lichtbogendiagnostik in schaltgeräteähnlichen Anordnungen, in der das Magnetfeld des Bogens ausgewertet wird. In dieser Arbeit werden Induktionsspulensensoren zur Lichtbogendiagnostik herangezogen. Dabei steht die Verfolgung der Fußpunkte des Lichtbogens während des Schaltversuches im Fokus der Untersuchungen. Nach [13] können die Induktionsspulensensoren in zwei Koordinatenrichtungen ausgerichtet werden, siehe **Bild 4.4**.

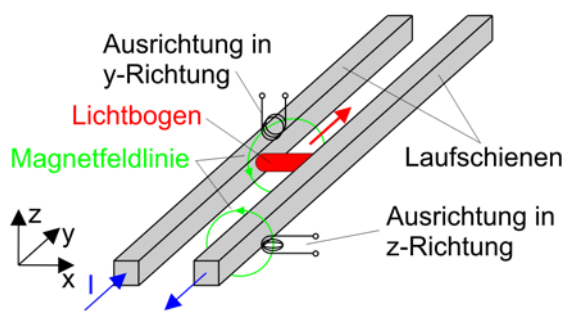


Bild 4.4: Anordnung der Induktionsspulensensoren

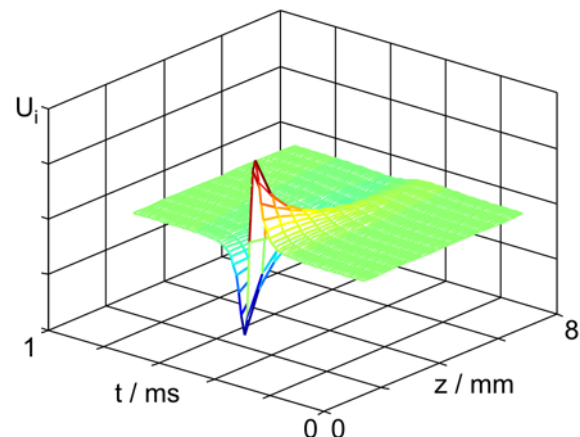


Bild 4.5: Simulierter Verlauf der induzierten Spannung als Funktion des Ortes und der Zeit

Während mit den in y-Richtung (Laufrichtung des Bogens) ausgerichteten Sensoren nur das Magnetfeld des Lichtbogens ausgewertet wird, erfassen die in z-Richtung ausgerichteten Sensoren sowohl das Magnetfeld der Laufschienen als auch das Magnetfeld des Lichtbogens. Da die Untersuchungen zur Erkennung der Fußpunktbewegung des Lichtbogens durchgeführt werden, kommen für die Aufgabenstellung nur die in y-Richtung ausgerichteten Sensoren in Frage. Des Weiteren erzeugt der Lichtbogen beim Vorbeilaufen an diesen Sensoren ein Maximum im Verlauf der Magnetflussdichte und damit einen Nulldurchgang in der induzierten Spannung, siehe **Bild 4.5**. Ein solcher Nulldurchgang ist trotz des mit steigendem Abstand des Sensors vom Lichtbogen (z-Richtung) starken Abfalls im Signal für eine automatisierte Auswertung der Messungen sehr gut geeignet.

Unter Verwendung der erwähnten Induktionsspulensensoren wurde ein Messsystem entwickelt, welches für die Verfolgung der Fußpunkte geeignet ist. Das Messsystem besteht aus zwei Messplatinen mit 16 Induktionsspulensensoren pro Platine. **Bild 4.6** zeigt ein Schema des Messsystems und zwei unterschiedliche Platinen.

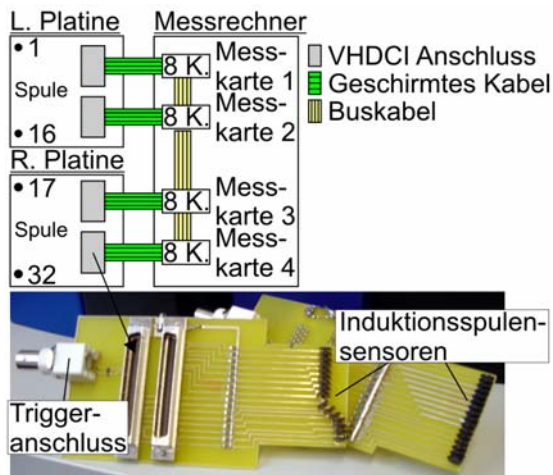


Bild 4.6: Schema des Messsystems und Messplatinen

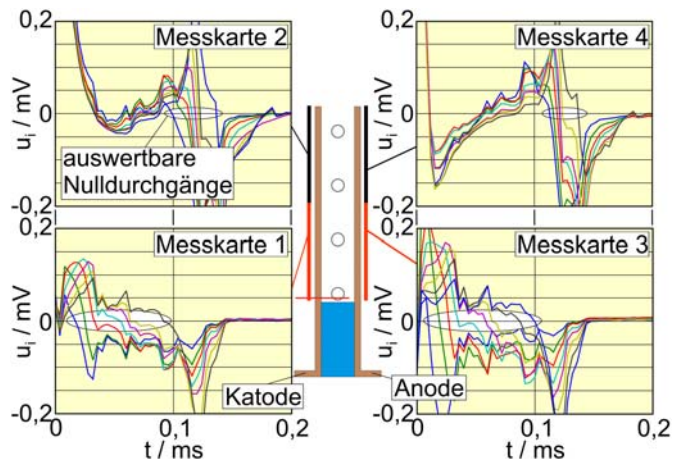


Bild 4.7: Sensorsignale für einen Prüfstrom von 3 kA

Mittels geschirmter Kabel sind die Platinen mit den 4 Messkarten innerhalb des Messrechners verbunden. Alle Messkarten sind taktgesteuert unter Verwendung des Buskabels. Das Messsystem hat eine räumliche Auflösung von 2,54 mm bei einer Abtastrate von 250 kS/s. **Bild 4.7** zeigt gemessene Sensorsignale für einen Lichtbogenvorgang im Versuchsmodell mit parallelen Laufschiene bei einem Prüfstrom von 3 kA entsprechend Variante 2. Unter Verwendung der Positionen der Induktionsspulensensoren ist es möglich, die entsprechende Weg-Zeit-Kennlinie der Lichtbogenbewegung zu berechnen.

Die Ergebnisse der Magnetfeldmessung wurden durch optische Messungen mit dem Kamerasystem KODAK/EKTAPRO verifiziert. Bei der ausgewählten Bildaufnahmerate (40500 Bilder/Sekunde) können Aufnahmezeiten von bis zu 25 ms verwirklicht werden. Durch eine Auswertung der Hell-Dunkel-Übergänge in den einzelnen Bildern ist es möglich, Weg-Zeit-Kennlinien der Lichtbogenbewegung zu generieren. **Bild 4.8** zeigt die Verläufe von Bogenfront und Bogenrücken aus den optischen Messungen im Vergleich mit den Verläufen aus der Magnetfeldmessung für einen Lichtbogenvorgang im Versuchsmodell mit einer abgewinkelten Laufschiene bei einem Prüfstrom von 1 kA entsprechend Variante 2.

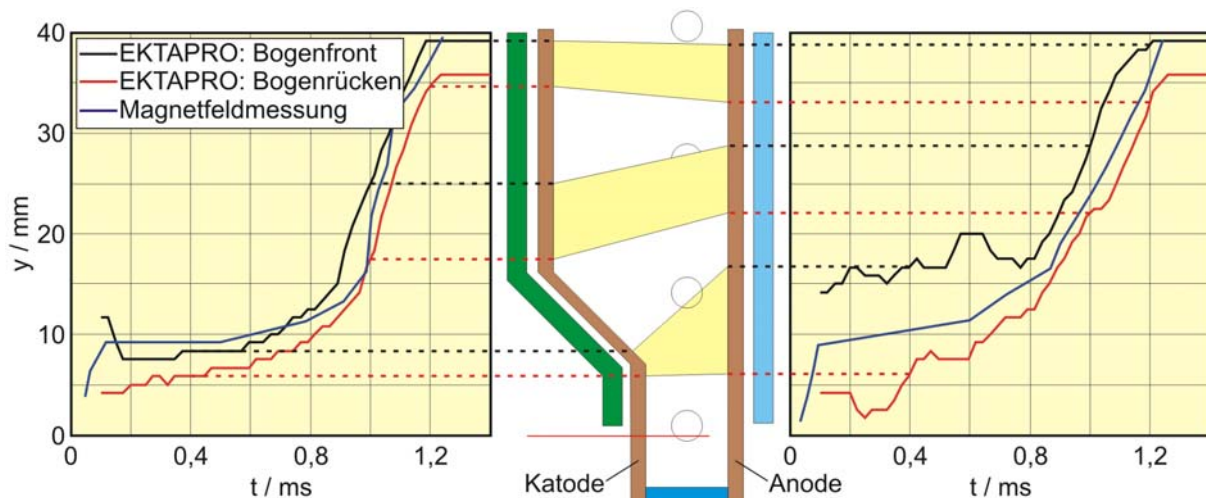


Bild 4.8: Weg-Zeit-Kennlinie des Lichtbogenvorganges im Versuchsmodell mit einer abgewinkelten Laufschiene (ohne Löschbleche) für einen Prüfstrom von 1 kA

Die gute Übereinstimmung beider Messmethoden ist offensichtlich und verifiziert sowohl die optische Messung als auch die Magnetfeldmessung. Aus **Bild 4.8** wird deutlich, dass der Katodenansatz des Lichtbogens ziemlich konzentriert über längere Zeit an der unteren Ecke verharrt und dadurch dem Anodenansatz hinterher eilt. Im weiteren Verlauf des Schaltversuchs kehrt sich dieses Verhalten um.

4.4 Druckmessung

Im Rahmen der hier vorgestellten Untersuchungen wurden beschleunigungskompensierte piezoelektrische Drucksensoren verwendet, die über einen Impedanzwandler im Sensor verfügen und durch eine batteriebetriebene Konstantstromquelle gespeist werden.

Der Einbau der Drucksensoren im Versuchsmodell entsprechend der Variante 2 erfolgte nach den Sensorherstellerempfehlungen und ist im Schema nach **Bild 4.9** dargestellt.

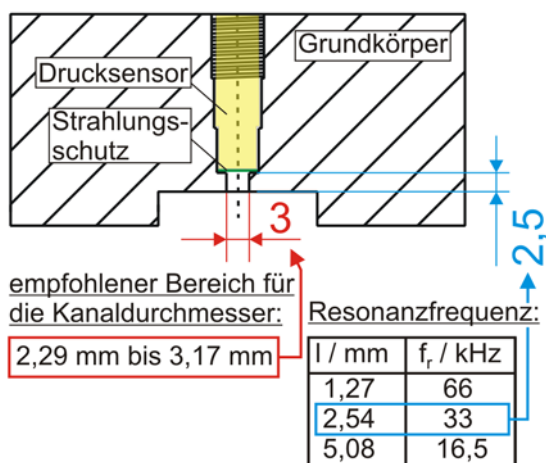


Bild 4.9: Einbau der Drucksensoren im Versuchsmodell (Variante 2)

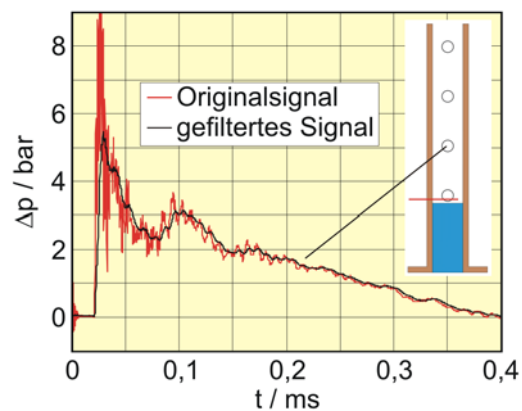


Bild 4.10: Vergleich von Original- und gefiltertem Signal (Tiefpass, f_g = 33 kHz)

Die Verbindung zwischen dem Schaltvolumen und der Membran des Drucksensors ist über einen Gaskanal gegeben. Bei der Interpretation der Ergebnisse der Druckmessungen ist der Einfluss dieses notwendigen Gaskanals zu berücksichtigen. Durch die Strömungsvorgänge im Schaltvolumen wird die Gassäule im Verbindungskanal zum Sensor zu hochfrequenten Schwingungen angeregt, die sich dem eigentlichen Drucksignal überlagern. **Bild 4.10** zeigt für einen Prüfstrom von 3 kA das während des Lichtbogenvorganges im Versuchsmodell mit parallelen Laufschiene gemessene Originalsignal. Der Vergleich mit dem gefilterten Signal verdeutlicht, dass speziell die erste Amplitude im Drucksignal aufgrund des Einflusses des Gaskanals stark überschätzt wird.

Aus den gemessenen Drucksignalen der 4 Sensoren lassen sich Informationen bzgl. der Geschwindigkeit generieren, mit der sich die durch die Zündung des Lichtbogens erzeugte Stoßwelle durch das Versuchsmodell bewegt, siehe **Bild 4.11**.

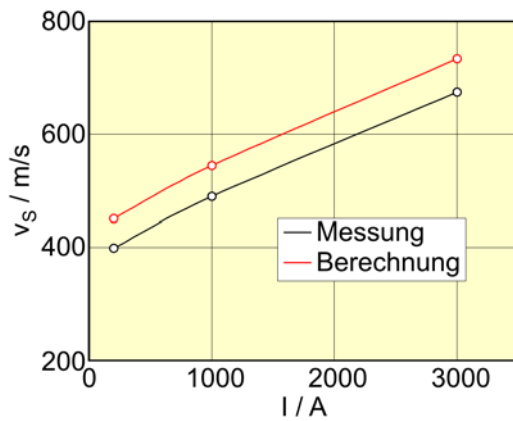


Bild 4.11: Stoßwellengeschwindigkeit als Funktion des Stromes

Die gemessenen Werte für die Stoßwellengeschwindigkeit in **Bild 4.11** stellen Mittelwerte der entsprechenden Messungen dar. Die berechneten Werte wurden entsprechend der Stoßwellentheorie (z. B. [15]) gewonnen. Dabei kann die Stoßwellengeschwindigkeit v_s berechnet werden durch

$$v_s = c_0 \cdot \sqrt{\frac{\gamma + 1}{2 \cdot \gamma} \cdot \left(\frac{p_1}{p_0} - 1 \right) + 1}, \quad (4.1)$$

wobei c_0 die Schallgeschwindigkeit und γ der Isentropenexponent ist.

p_1 ist der Druck im Lichtbogen volumen, der mit dem unteren Drucksensor gemessen wurde und p_0 der Umgebungsdruck. Der Vergleich von gemessenen und berechneten Stoßwellengeschwindigkeiten ist zufrieden stellend und verifiziert die Gasdruckmessung.

5 Zusammenfassung

Das Lichtbogenverhalten in Niederspannungs-Schaltgeräten oder ähnlichen Versuchsaufbauten ist ein sehr komplexes Phänomen und nur durch das Einsetzen angepasster Messtechnik zu erfassen. Um Auswirkungen auf das Lichtbogenverhalten zu vermeiden, die aus der Entstehung des Lichtbogens resultieren, ist eine reproduzierbare Erregergröße (Prüfstrom) für die Lichtbogenvorgänge notwendig. Unter Verwendung eines Hochspannungs-Impulsgenerators konnte diese Forderung erfüllt werden.

Für die optischen Untersuchungen wurden zwei verschiedene Hochgeschwindigkeitskameras verwendet, die sich im Wesentlichen durch die technischen Parameter räumliche Auflösung, Belichtungszeit und Bildanzahl unterscheiden. Für den Einsatz der jeweiligen Kamera und bei der Interpretation der Ergebnisse der optischen Untersuchungen müssen diese technischen Parameter Berücksichtigung finden.

Durch ein neues System für die Auswertung des magnetischen Feldes durch den Lichtbogen ist die Verfolgung der Lichtbogenfußpunkte entlang beider Laufschiene in einem Versuchsmodell möglich. Die Ergebnisse der Magnetfeldmessung korrelieren gut mit den Ergebnissen der optischen Messungen.

Die Druckmessungen erfolgten mit piezoelektrischen Drucksensoren, deren Membran über einen Gaskanal mit dem Schaltvolumen verbunden ist. Die erste Amplitude im gemessenen Drucksignal wird durch den Einfluss dieses Gaskanals überschätzt. Mittels eines Tiefpasses mit der entsprechenden Grenzfrequenz ist es möglich, diesen Einfluss herauszufiltern.

Die verwendete und teilweise durch eigene Anstrengungen entwickelte Messtechnik soll dahin ergänzt werden, dass die Messung weiterer Parameter des Schaltlichtbogens wie Temperatur und Leitfähigkeit ermöglicht wird.

Referenzen:

- [1] Schipper G.: *Untersuchung des Lichtbogenverhaltens in kompakten, strombegrenzenden Löschblechkammern*. Braunschweig, TU, Diss., 1994
- [2] Paulke J.: *Lichtbogenbewegung und Druckentwicklung in kompakten Löschkammern*. Braunschweig, TU, Diss., 1997
- [3] Weaver P.M., McBride J.W.: *Magnetic and gas dynamic effects on arc motion in miniature circuit breakers*. Proc. 39th Holm Conf. on Electrical Contacts, Pittsburgh, 1993
- [4] Zeller P., Rieder W.: *Arc structure, arc motion and gas pressure between laterally enclosed arc runners*. Proc. 44th Holm Conf. on Electrical Contacts, Arlington, 1998
- [5] Pechrach K., McBride J.W. u.a.: *Gas flow and composition effects on arc motion in current limiting circuit breakers*. Proc. 47th Holm Conf. on Electrical Contacts, Montreal, 2001
- [6] Takeuchi M., Kubono T.: *The spatial distribution of temperature in a cross section of arc column nearby cathode contact*. Proc. 41st Holm Conf. on Electrical Contacts, Montreal, 1995
- [7] Hong D., Sandolache G. u.a.: *A new technique for investigation of low voltage circuit breakers*. IEEE Trans. on Plasma Sci. Vol 35, 2005
- [8] Chabrierie J.P., Devautour J.: *Contribution to the study of interactions between an atmospheric pressure arc root and Cu, Ag, or Ag M. O. electrodes*. Proc. 36th Holm Conf. on Electrical Contacts, Montreal, 1990
- [9] Lindmayer M., Mutzke A., Rütter Th.: *Messungen und Simulation von Schaltlichtbögen in Löschblechkammern*. 18. Albert-Keil-Kontaktseminar "Kontaktverhalten und Schalten", Karlsruhe, 2005
- [10] Shea J.J., Boles D. u.a.: *Computer animated digital arc diagnostic system*. Proc. 39th Holm Conf. on Electrical Contacts, Pittsburgh, 1993
- [11] Gauster E., Rieder W.: *Arc-wall interaction phenomena immediately after contact separation in magnet-blast interrupters*. Proc. 41st Holm Conf. on Electrical Contacts, Montreal, 1995
- [12] Cajal D., Debellut F. u.a.: *A study of the effects of a quenching chamber on the electric arc behaviour in a low voltage circuit breaker using the „magnetic camera“*. Proc. 9th Int. Conf. on Switching Arc Phenomena, Lodz, 2001
- [13] Schade D.: *Über die Wanderung von Hochstromlichtbögen in Leitschieneanordnungen*. Braunschweig, TU, Diss., 1994
- [14] Cajal D., Toumazet J.P. u.a.: *Influence of contact materials on the current transfer thanks to the current distribution measurement in a low-voltage breaking device by means of a magnetic diagnostics*. Proc. 50th Holm Conf. on Electrical Contacts, Seattle, 2004
- [15] Anderson J. D.: *Modern compressible flow*. New York : McGraw-Hill Book Company, 1982

Autoren:

Dr. Frank Reichert, Dr. Diego Gonzalez, Dipl.-Ing. Anja Marschall
Institut für Elektrische Energie- und Steuerungstechnik
Technische Universität Ilmenau
Postfach 100565
98684 Ilmenau
Telefon: 03677/692834
Telefax: 03677/691686
E-mail: frank.reichert@tu-ilmenau.de